Tecnologia Industrial I

Producció d'energia elèctrica

Jordi Orts

Tecnologia Industrial I
Producció d’energia elèctrica.
Jordi Orts

1a Edició, setembre 2020

Aquest llibre ha estat redactat íntegrament amb LibreOffice, i ha estat maquetat especialment per a la seva visualització amb netbooks, lectors d'ebooks i tablets, i exportat a PDF amb aquesta mateixa eina. Les imatges han estat retocades amb GIMP.

Trobareu la darrera versió d'aquesta obra a la web de l'autor: http://www.jorts.net

Índex

. Fonts d’energia convencionals....9
Centrals hidràuliques....9
La presa....11
Tipus de presa....12
Presa de gravetat....12
Presa de contraforts....14
Presa de volta....14
Tipus de turbina....17
Turbina Pelton....18
Turbina Francis....19
Turbina Kaplan....20
Centrals de bombeig....21
Impacte ambiental....22
Flexibilitat de les central hidràuliques....23
Centrals tèrmiques....24
Sistemes de refrigeració....26
Turbines d’alta, mitja i baixa pressió....28
Rendiment....29
Impacte ambiental....29
Centrals de cicle combinat....30
Centrals de cogeneració....31
Inèrcia de les centrals tèrmiques....31
Centrals nuclears....32

Combustible nuclear....32
L’absorbent....34
El moderador....34
El refrigerant....34
Mur de contenció....35
Reactors PWR....35
Reactors BWR....37
Recanvi del combustible....39
Inèrcia de les centrals nuclears....39
Objectiu estratègic....40
Impacte ambiental....40
. Fonts d’energia alternatives....43
Minihidràulica....43
Energia solar....44
Energia solar fotovoltaica....45
Impacte ambiental....47
Energia solar tèrmica....48
Impacte ambiental....50
Energia eòlica....51
Parcs eòlics....54
Autoconsum....55
Impacte ambiental....55
Energies del mar....56
Energia mareomotriu....56
Energia de les onades (undimotriu)....57
Energia maremotèrmica del gradient tèrmic (OTEC)....58
Energia de les corrents marines....59
Impacte ambiental....60

Energia geotèrmica..60
Impacte ambiental..62
Biomassa i residus renovables..62
Centrals nuclears de fusió...64
. Cap a un mon sostenible: la necessària transició energètica...68

. Fonts d’energia convencionals

Fins fa poques dècades la major part de l’electricitat es produïa en un reduït tipus de centrals. No es tenia consciència de l’impacte ecològic de de les fonts d’energia utilitzades, com ara els combustibles fòssils o nuclears de fissió. Com veurem, van aparèixer problemes greus: boires fotoquímiques, pluja àcida, efecte hivernacle ...

Primer començarem estudiant aquestes fonts d’energia i les centrals que s’utilitzen pel seu aprofitament

Centrals hidràuliques

Aquestes centrals fan servir l’energia cinètica de l’aigua en moviment per fer girar una turbina acoblada a un alternador, que generarà l’energia elèctrica desitjada. Moltes vegades s’aconsegueix un increment de l’energia cinètica emmagatzemant l’aigua amb una pressa, de forma que l’energia potencial de l’aigua es converteix en energia cinètica per les canonades per on baixa. Altres vegades es fa una captura d’aigua a un nivell superior del riu, de forma que baixa de forma moderada per un canal fins arribar a una cota inferior del riu, incrementant el salt d’aigua just abans de la central.

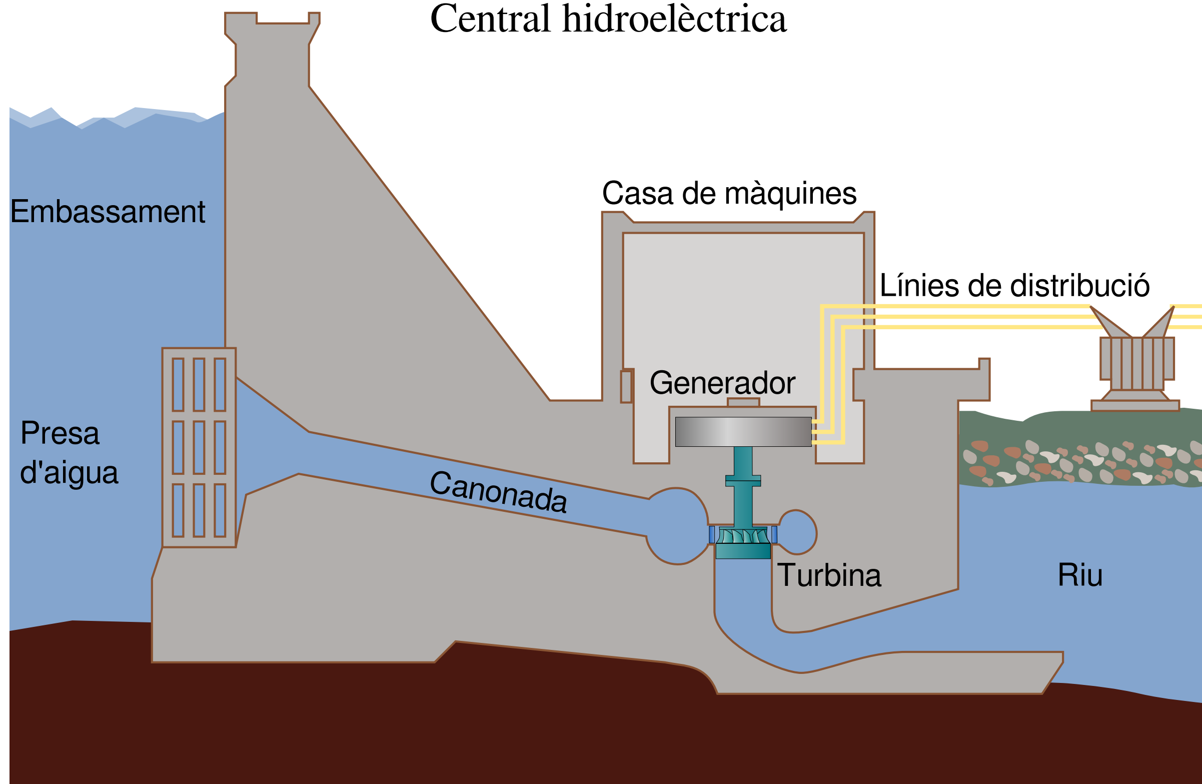
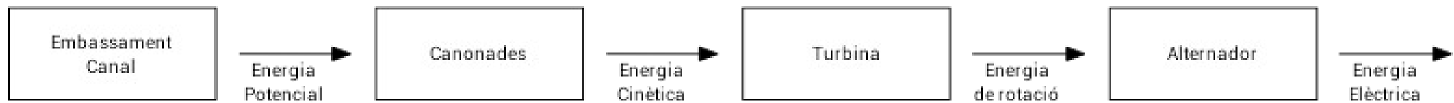


Figura 1: Pas de l'aigua d'un riu a través d'una central hidroelèctrica. Font: Cristianrodenas/Thoti/Tomia CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16957065

Veiem el diagrama energètic d'aquestes centrals:



Penseu que en cada una d'aquestes conversions hi ha un rendiment inferior a 1: l'aigua s'escalfa lleugerament en baixar per les canonades, la turbina s'escalfa en el seu gir, a l'igual que l'alternador, que a més a més s'escalfa per l'efecte Joule del corrent que produeix a les seves bobines. Hauríem d'afegir també el rendiment del transformador que, com a totes les centrals energètiques distants del lloc de consum, eleva la tensió elèctrica fins a centenars de kV per evitar pèrdues en el seu transport.

Les tecnologies associades al disseny, construcció, manteniment i explotació aquestes centrals són molt diverses. Anem a veure algunes característiques:

La presa

La presa atura el curs natural d'un riu i permet crear un desnivell a mesura que s'inunda la vall que

tanca. Ha de suportar la pressió de l'aigua, que bé donada per l'expressió

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

on

ρ = 1000 kg · m^{-3} (densitat de l'aigua)

g = 9,807·m·s^{-2} (acceleració gravitacional de la terra)

h = alçada de la presa

Per exemple, el mur de la presa de Susqueda al Ter té una alçada de 129 m. Per tant, el mur de la presa a la seva part inferior ha de suportar una pressió de 1,3 MPa

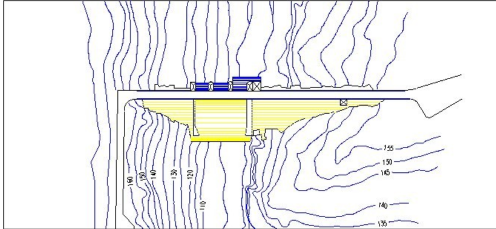
Tipus de presa

Presa de gravetat

Aquest tipus és el que més material utilitza. Si bé a la part superior els gruix és normal (típicament s'aprofita el mur de la pressa per fer una carretera que uneix els dos extrems de la vall) a mesura que baixem el gruix és fa molt més ample per suportar la pressió de l'aigua acumulada.

Personalment no puc evitar recordar les esglésies romàniques quan veig una d'aquestes preses.

Presa de Boadella
Tipus: gravetat
Riu: Muga



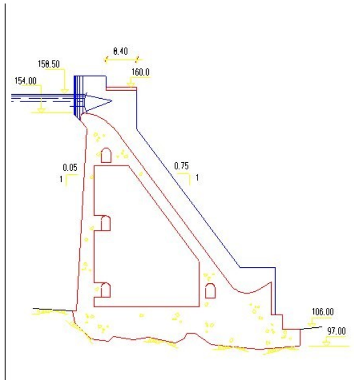




Figura 2: Presa de Boadella. Font: Inventario de presas y embalses (IPE) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://sig.mapama.gob.es/snczi/

Capacitat embassament: 60 hm^3
Superfície embassament: 3,6 km^2
Longitud de coronació: 250 m
Alçada des dels fonaments: 63 m

Presa de contraforts

Utilitza menys material que la presa de gravetat, ja que es reforça amb uns contraforts que distribueixen la càrrega sobre la presa. D’aquesta forma es redueix l’increment del gruix del mur de la pressa a la part inferior.

Personalment me’n recordo de l'església romànica de Sant Joan de Vilamajor i els seu contraforts.

Presa de volta

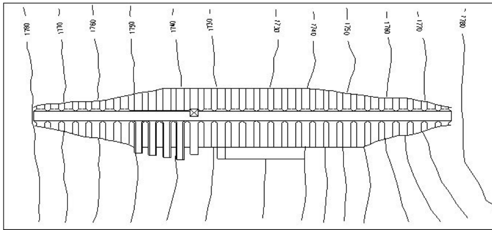
És la que menys material utilitza, aprofitant la distribució de forces a l’arc de la presa. Naturalment, com la força de la pressió de la presa es concentra en els extrems de l’arc, aquests han de estar ben apuntalats.

Personalment la bellesa i esveltesa d’aquestes preses em recorden les catedrals gòtiques i modernistes.

Presa de Cavallers

Tipus: contraforts

Riu: Noguera de Tort



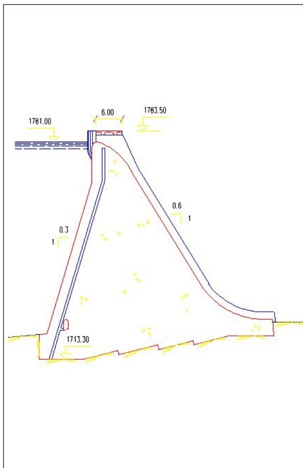




Figura 3: Presa de Cavallers. Font: De Josep Borrut - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15766859

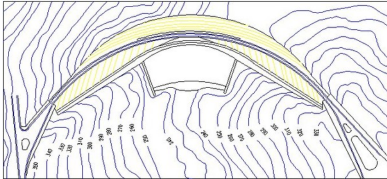
Capacitat embassament: 16 hm^3

Superfície embassament: 0,47 km^2

Longitud de coronació: 360 m

Alçada des dels fonaments: 70 m

Presa de Susqueda
Tipus: volta
Riu: Ter



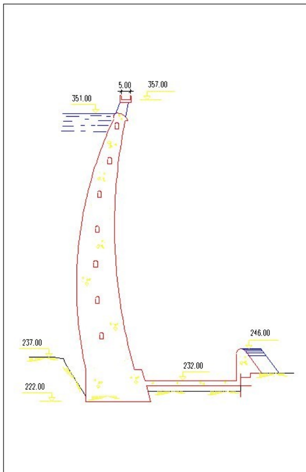




Figura 4: Presa de Susqueda. Font: Inventario de presas y embalses (IPE) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://sig.mapama.gob.es/snczi/

Capacitat embassament: 233 hm^3
Superfície embassament: 4,6 km^2
Longitud de coronació: 501 m
Alçada des dels fonaments: 135 m

Tipus de turbina

La turbina fa la conversió d’energia cinètica a energia de rotació.

N’hi ha diferents tipus. Les més utilitzades són les turbines Pelton, Francis i Kaplan.

Cal escollir el tipus de turbina segons el salt i el cabal de la central. Això permet treballar amb una turbina amb un rendiment superior al 90 %.

$$P=\eta\cdot p\cdot q=\eta\cdot\rho\cdot g\cdot h\cdot q$$

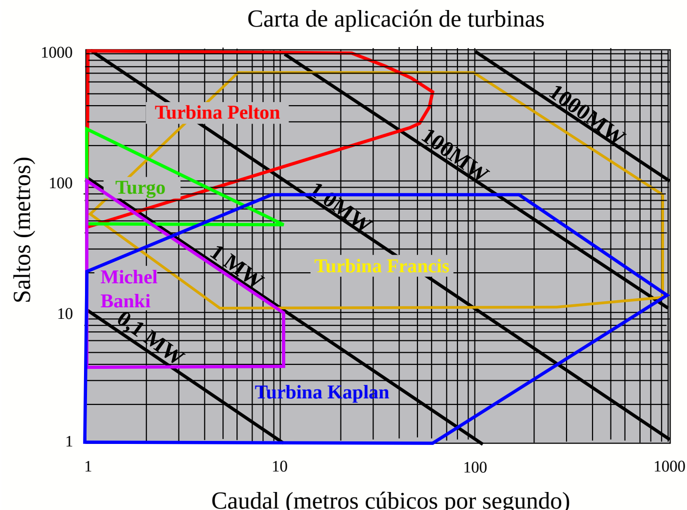


Figura 5: Selecció de turbines en funció del cabal i el salt. Font: By NACLE2 - File:Water Turbine Chart.png, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9319992

Turbina Pelton

Optimitzada per grans salts d’aigua i petits o mitjans cabals.

Molt utilitzada a les centrals del Pirineu.

Turbina d’acció: l’aigua s’aplica sobre ella directament i la fa moure. Eix de gir horitzontal.

Els àleps tenen un perfil en forma de cullera doble.

Els injectors dirigeixen l’aigua a alta pressió sobre els àleps. Porten una agulla interior que permet controlar el cabal.

Les centrals reben l’aigua des d’unes canonades llargues, fins-i-tot de kilòmetres, que podem observar fàcilment a les nostres muntanyes.

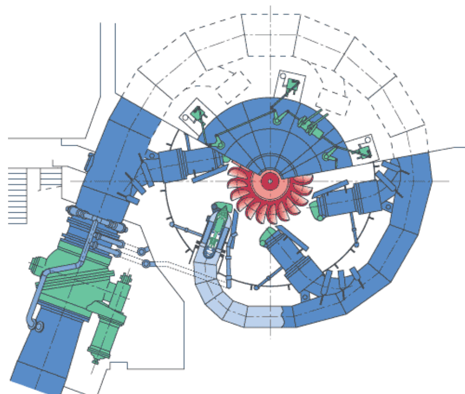


Figura 6: Secció d'una instal·lació amb turbina Pelton. Font: By Voith Siemens Hydro Power Generation - http://www.voithsiemens.com, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=463252

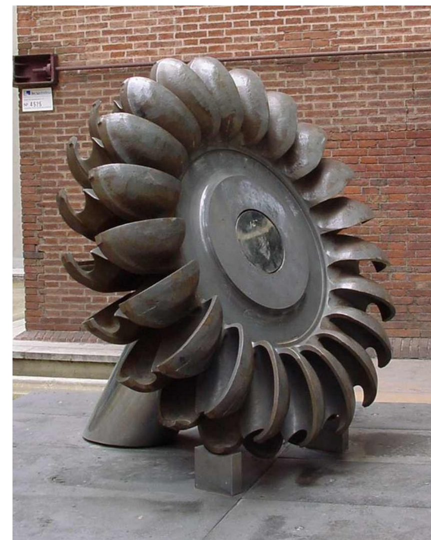


Figura 7: Turbina Pelton. Font: By Andy Dingley - Own work, CC BY https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2007524

Turbina Francis

Optimitzada per salts no molt grans i cabals importants.

Turbina de reacció: l’aigua circula a través d’ella i la fa moure. Eix de gir vertical.

El rotor, amb àleps corbats, rep l’aigua de la part fixa, que porta unes guies corbades (deflectors). La inclinació dels deflectors és regulable i permet ajustar el cabal.



Figura 8: Deflectors (en groc) d'una turbina Francis configurats a flux ple. Font: By The original uploader was Stahlkocher at German Wikipedia. - Originally from de.wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=85431

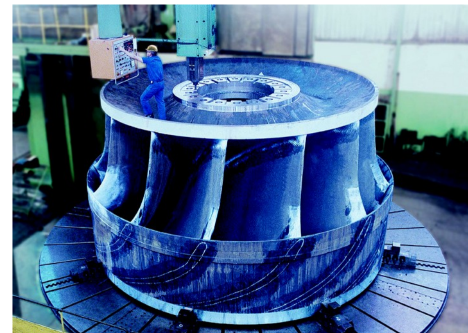


Figura 9: Rotor d'una Turbina Francis. Font: By Voith Siemens Hydro Power Generation - Homepage: http://www.voithsiemens.com, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=546624

Turbina Kaplan

Optimitzada per petits salts i grans cabals.
Molt utilitzada a embassaments
Turbina de reacció: l’aigua circula a través d’ella i la fa moure. Eix de gir vertical.
La inclinació dels deflectors i dels àleps del rotor és regulable i permet ajustar el cabal.
També es poden fabricar microturbines amb aquest disseny, operatives amb només 0,3 m de salt, molt útils a centrals fluents.
També s’estan utilitzant aquestes turbines a les costes marines, aprofitant la força de les onades.

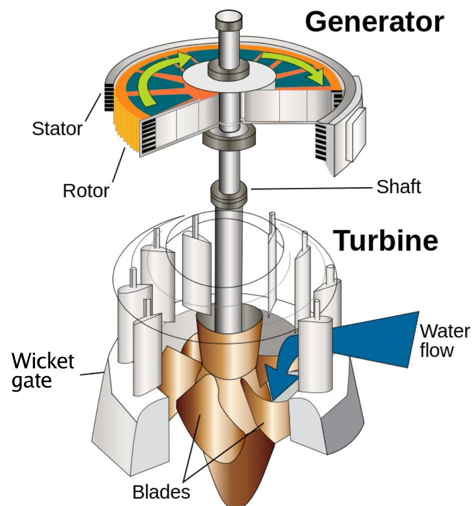


Figura 10: Turbina Kaplan acoblada a l'alternador. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18581340



Figura 11: Turbina Kaplan. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2050462

Centrals de bombeig

Les centrals de bombeig, bombament o reversibles utilitzen dos embassaments, de forma que l'aigua que surt de la turbina torna a ser emmagatzemada.

Les turbines són reversibles: poden funcionar també com a bombes hidràuliques (els alternadors actuen com a motors).

D'aquesta forma la central pot funcionar com un gran magatzem d'energia. Quan la xarxa global produeix més energia que la demanda, s'emmagatzema en forma d'energia potencial a l'embassament superior. Quan es necessita més energia a la xarxa que la que es produeix aquesta energia emmagatzemada s'allibera.

Aquest tipus de central poden ser claus en un model sostenible dominat per la utilització d'energies alternatives com l'eòlica o solar, que si bé són netes el seu subministrament depèn de les condicions del moment: sol, vent ...

A Sallent / Estany Gento tenim un exemple d'aquest tipus de central.

Impacte ambiental

Si bé les centrals hidràuliques es consideren en un model sostenible de la generació d’energia, no podem menystenir el seu impacte ambiental:

- L’embassament d’aigua a les preses canvia el clima localment: canvis en la vegetació (més humitat afavoreix altres espècies), inversió tèrmica... Fins-i-tot l’embassament d’un volum d’aigua excessiu o en un entorn desfavorable pot ser contraproduent, com és el cas de la presa d’Assuan. També suposa un obstacle per a animals en el seu cicle reproductiu (aïllament que impedeix la trobada de mamífers en l’època de cel, salts d’altura insalvables per espècies com el salmó que tornen al seu lloc de naixement a l’aigua dolça de del mar per desovar ...). A més a més la presa representa un obstacle pel transit dels sediments produïts per l’erosió i impedeix la regeneració dels deltes dels rius, per exemple.

- El desviament d’aigua d’un riu mitjançant un canal per aconseguir concentrar el salt d’aigua a prop de la central ha de respectar la reserva d’un cabal ecològic que mantingui l’ecosistema al segment del riu evitat.

- La construcció de la central, dels materials amb que està feta, té una petjada ecològica pròpia.

Per altra banda no podem oblidar els beneficis, més enllà de la producció d’energia neta, que obtenim, especialment el control del flux del riu, que evita inundacions i sequeres, catàstrofes naturals que avui en dia quasi hem oblidat.

Flexibilitat de les central hidràuliques

Les centrals hidràuliques tenen una característica molt especial: es poden aturar i posar en marxa en qüestió de segons. Si, a més a més, el disseny de la central té una combinació de turbines intel·ligent, típicament dos turbines una amb ⅓ de la potència de la central i l’altra amb ⅔ d’aquest valor, podem ràpidament canviar la producció de la central entre 0, ⅓, ⅔ o el 100 % de la seva potència, flexibilitat que ens permet acomodar la producció de la xarxa a la demanda en aquell moment.

Centrals tèrmiques

A les centrals tèrmiques es crema un combustible per produir vapor a pressió, que mitjançant una turbina acoblada a un alternador generarà energia elèctrica. El seu diagrama d’energies és, per tant:



Típicament el combustible cremat és un combustible fòssil (carbó, gas...), una font de energia exhaurible que estem esgotant i que és incompatible amb un desenvolupament sostenible. A més a més, la utilització d’aquests combustibles fòssils implica contaminació i altres impactes ambientals importants que estudiarem.

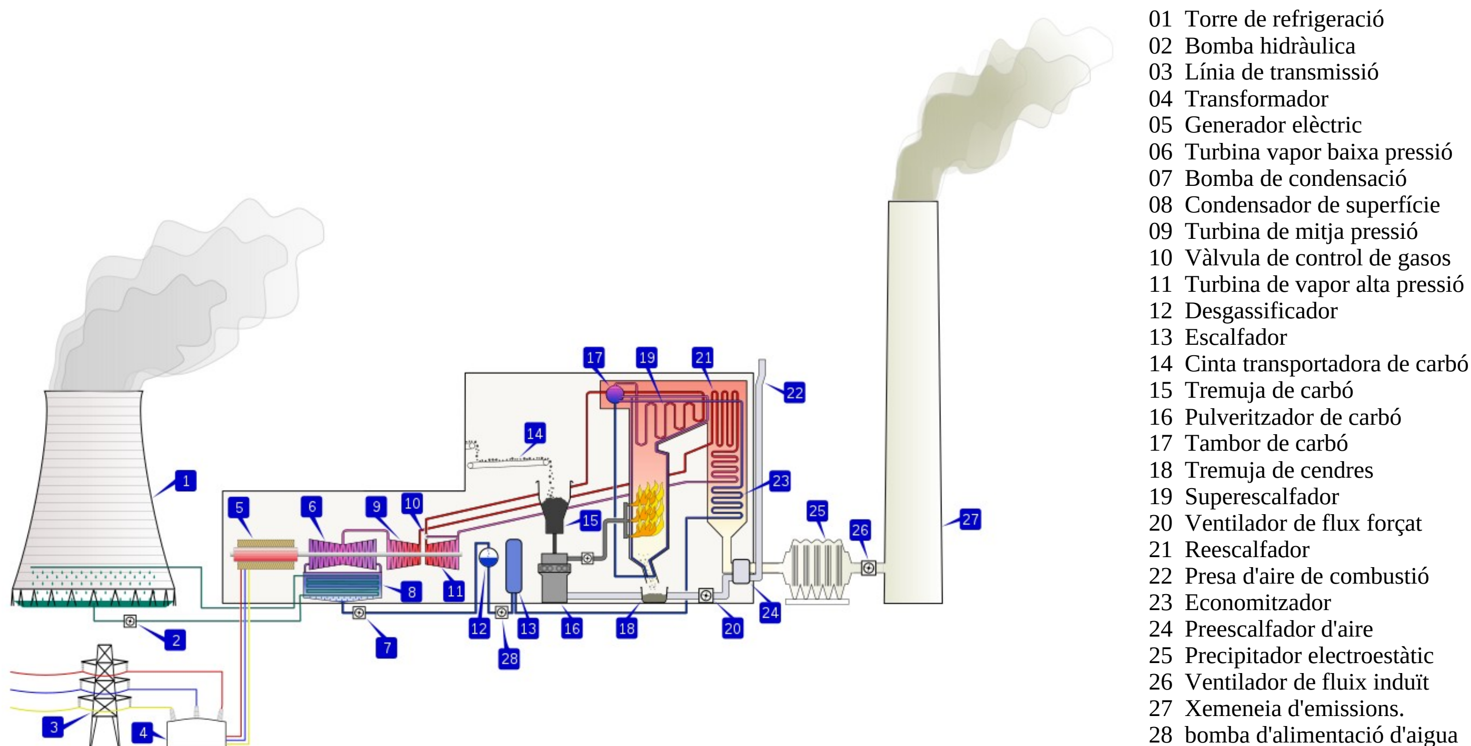


Figura 12: Diagrama i parts més importants d'una central tèrmica de carbó i cicle convencional. Font: BillC CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2842716

Sistemes de refrigeració

El rendiment de la central millora si en lloc d'alliberar el vapor una vegada que ha exercit força sobre les turbines el condensem obtenint aigua molt calenta que tornem a introduir al cicle de generació. Per a aquest motiu es fa servir un condensador que es refreda amb un circuit exterior d'aigua, aigua freda que es pot obtenir del mar o d'un riu. En aquest segon cas l'aigua escalfada pel condensador ha de ser a la seva vegada refredada per l'atmosfera en un torre de refrigeració abans de tornar al riu, per minimitzar el seu impacte ecològic.

Això també és aplicable a les centrals nuclears, que veurem més endavant, ja que les centrals nuclears no deixen de ser centrals tèrmiques on la calor es produeix per una reacció nuclear, en lloc de la reacció química a les centrals tèrmiques convencionals.

Refrigeració amb aigua de mar



Figura 13: Canonades refrigeració central tèrmica Sant Adrià de Besòs. Font: Jordi Orts

Refrigeració amb torre de refrigeració



Figura 14: Torre de refrigeració central tèrmica Cercs. Font: Jordi Orts

Turbines d’alta, mitja i baixa pressió

Les turbines de vapor de les centrals tèrmiques i nuclears són molt diferents de les que hem vist a les centrals hidràuliques. La força del vapor produït a la caldera és tan gran que l’única solució possible per extraure tota aquesta força sense trencar la turbina es treballar inicialment amb àleps molt petits, i conforme el vapor perd pressió, incrementar la mida de l’àlep per mantenir el producte $F = p \cdot S$ constant. Per optimitzar aquest sistema, es treballa típicament amb tres conjunts de turbines connectades, d’alta, mitja i baixa pressió, amb radis cada vegada més grans.



Figura 16: Turbina de baixa pressió d'una central nuclear. Font: By Christine und David Schmitt, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16157413



Figura 15: Sala de turbines a la central de Sant Adrià de Besòs. Font: Jordi Orts

Degut a les altes temperatures i esforços a que estan sotmeses les turbines de vapor aquestes es fabriquen amb superal·liatges de niquel amb alumini i titani, recoberts amb una capa de ceràmica de diòxid de zirconi.

Rendiment

El rendiment típic d’una central tèrmica es baix, al voltant d’un 33 %. Això vol dir que per cada kWh d’electricitat que arriba a casa nostra s’allibera el doble d’energia en forma de calor al nostre planeta, contribuint al seu escalfament global.

Impacte ambiental

A més a més de la seva contribució a l’escalfament global pel seu rendiment, les central tèrmiques produeixen CO2 en la combustió, incrementant l’efecte hivernacle al nostre planeta.

Per altra banda, la utilització de carbó com a combustible, que porta compostos de sofre i d’altres impureses, afegeix la producció d’òxids de nitrogen i sofre, que provoquen la pluja àcida i boires fotoquímiques, amb un efecte devastador sobre la zona.

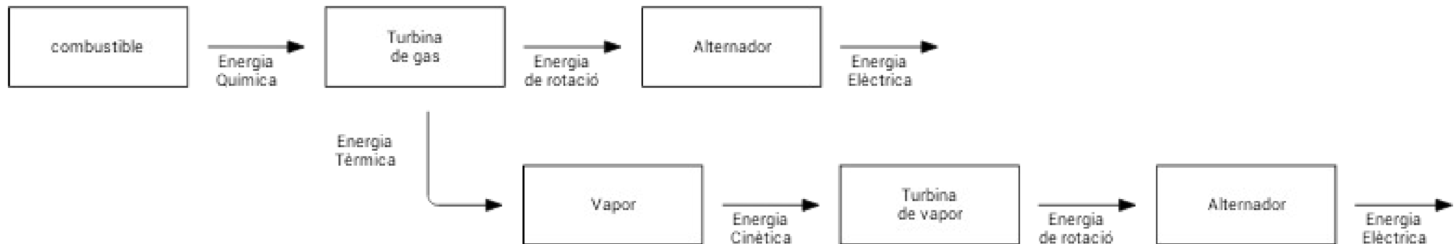
A més a més, les torres de refrigeració incrementen la humitat de l’aire, moltes vegades produint un xim-xim constant, que, per exemple a la central de Cercs, barrejat amb el fum de la xemeneia, feia malbé els cotxes dels treballadors. En el seu defecte, a les centrals refrigerades amb aigua de mar, la temperatura al voltant de la seva desembocadura puja uns graus, alterant l’ecosistema marí.



Figura 17: Xemeneia central tèrmica de Cercs. Font: Jordi Orts

Centrals de cicle combinat

Si el combustible és gas, en lloc de cremar-lo a la caldera es fa a una turbina de gas connectada a un segon alternador, i utilitzant la calor de la turbina per generar vapor en el típic cicle de la central tèrmica, s'aconsegueix augmentar el rendiment fins al 45 %.



El gas, a més a més, fa una combustió neta, on els productes generats son CO_2 i vapor d'aigua. Per tant, si bé no genera pluja àcida ni boires fotoquímiques, contribueix a l'escalfament del planeta agreujat per l'efecte hivernacle del CO_2, a més d'utilitzar una font d'energia exhaurible.

Centrals de cogeneració

Si part de la calor generada a la central s’aprofita, per exemple, per escalfar aigua sanitària, aigua d’una piscina... parlem de cogeneració, on el rendiment pot arribar al 85 %.

Si a més a més el combustible cremat no és un combustible fòssil, si no que es tracta de biomassa o biocombustible (fonts renovables d’energia), hem de considerar que el CO_2 alliberat es tornarà a capturar en la producció de nou combustible als conreus.

Amb aquest rendiment i en absència d’emissions netes de CO_2 (el CO_2 alliberat és el mateix que va capturar la planta que vam conrear) aquesta és, potser, una de les fonts d’energia més sostenible dintre de les centrals tèrmiques que podem trobar.

Inèrcia de les centrals tèrmiques

Típicament una central tèrmica triga unes 2h en aconseguir un funcionament òptim des de que iniciem la producció, ja que s’han d’escalfar molts elements. Per això cal programar la seva engegada unes hores abans de l’increment de la demanda, previsió feta a base d’estadístiques de consum.

Centrals nuclears

Com ja hem comentat, les centrals nuclears no deixen de ser unes centrals tèrmiques on la calor per generar vapor es produeix mitjançant una reacció nuclear. Per tant, molts dels seus elements ja són coneguts nostres, i ens centrarem en els aspectes mes diferenciats.



Combustible nuclear

Les centrals nuclears actualment en funcionament utilitzen exclusivament reaccions de fissió nuclear, es a dir, el trencament de nuclis pesats en altres més lleugers. Típicament s'utilitza l'urani ^{235}U , per la seva relativa abundància a la Pechblenda i d'altres minerals.



$$^{235}U + n \rightarrow {}^{93}Kr + {}^{140}Ba + 3n$$

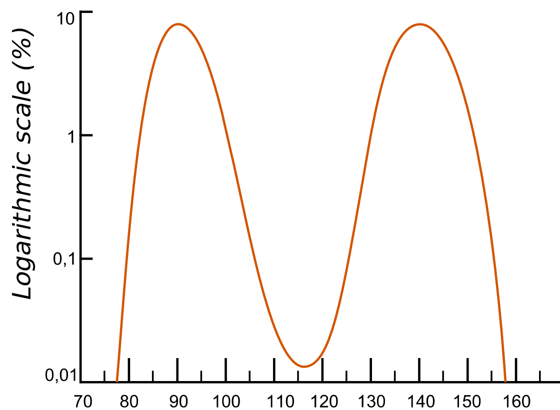


Figura 18: Distribució de productes de la fissió de l'urani 235. Font: Users:Mubs, KES47 CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11171477

Aquesta és només una de les diferents formes en que té l'urani ^{235}U la seva fissió, que permet diferents combinacions de fragments amb 33 < Z < 59 seguint una distribució estadística, amb un fragment al voltant de A=95 (Br, Kr, Zr) i l'altre al voltant de A=139 (I, Xe, Ba).

L'urani ^{235}U es troba a la barra de combustible en una proporció molt baixa (0,7% si s'utilitza en estat natural), on la proporció de ^{238}U arriba al 99,3 % i que no es desintegra, però es capaç d'absorbir neutrons i generar ^{239}Pu , que si que és combustible nuclear. Per aquest motiu el ^{238}U es considera un *material fèrtil*. Moltes vegades la proporció de ^{235}U s'incrementa prèviament i parlem d'*urani enriquit*.

Les barres de combustible porten l'urani en forma d'òxid UO_2

L'absorbent

Com heu vist a la reacció anterior en surten més neutrons dels que entren. En aquesta situació tindríem una reacció en cadena, que produiria una explosió com a Hirosima. Per evitar això s'utilitzen unes barres amb un material que absorbeix els neutrons, com ara alliatges de B, Cd, Ag i In. Aquestes barres es poden desplaçar, deixant passar més o menys neutrons i controlant la reacció.

El moderador

Per optimitzar la reacció és necessari baixar la velocitat dels neutrons emesos. Per això se'ls fa xocar amb materials amb àtoms petits, com ara l'aigua (normal o pesant, es a dir, amb l'isòtop deuteri de l'hidrogen) o el grafit.

El refrigerant

Cal portar la calor generada per la reacció al generador de vapor de la central. S'aconsegueix amb el refrigerant, ja sigui líquid (aigua, Na, K) o gas (CO_2, He, H_2, N_2)

Mur de contenció

Les parts més sensibles de la central, que produeixen radiació amb el conseqüent perill estan aïllades per un mur de contenció molt gruix de formigó, que impedeix que surti la radiació.

A més a més tota la central està dotada de pressió negativa, es a dir, cada sala té una pressió inferior a la sala exterior contigua, per evitar que surti cap tipus de partícula.

Reactors PWR

Els reactors d’aigua a pressió (Pressurized Water Reactor) utilitzen aigua a alta pressió com a moderador, refrigerant i també per generar el vapor que travessa les turbines. Com l’aigua lleugera captura més neutrons que l’aigua pesant, el combustible utilitzat és urani enriquit al 2% - 4 %.

Utilitza tres circuits de refrigeració: el primari, amb aigua a alta pressió (16 MPa), recull la calor del nucli del reactor. El circuit secundari rep aquesta energia del primari al generador de vapor. Com l’aigua del circuit secundari no ha estat en contacte directe amb el reactor pot sortir de l’edifici de contenció cap a les turbines. El circuit terciari s’utilitza per refredar el condensador, com a les centrals tèrmiques convencionals.

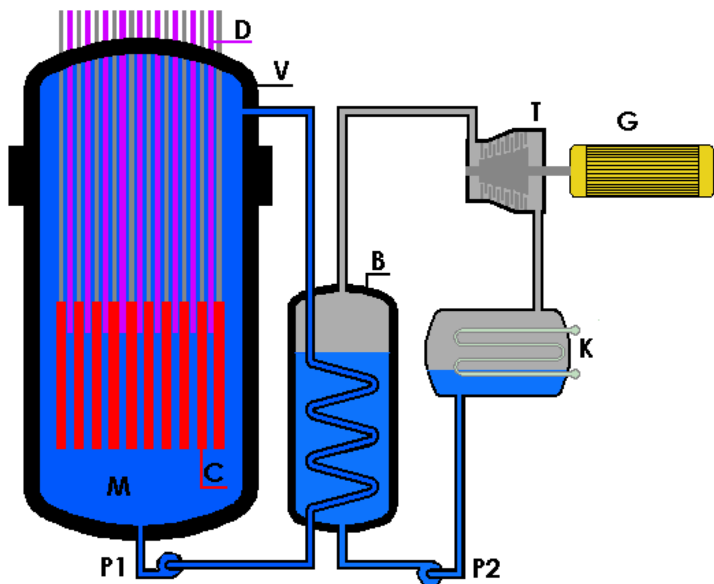


Figura 19: Central nuclear PWR.
Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=315039

Esquema d'una central nuclear PWR.
V: Reactor
C: combustible
T: turbina,
G: alternador
B: generador de vapor
K: condensador,
P1: circuit primari
P2: circuit secundari
El circuit terciari és el que es veu en part, en gris clar, a K, entra aigua per a refredar la de P2 a K, fins a condensar-la, de manera que la del circuit terciari surt escalfada cap a la torre de refrigeració.

La línia negra gruixuda indica que es troba dintre de l’edifici de contenció. En aquestes centrals només el reactor i el generador de vapor necessiten aquesta protecció, ja que el fluid que mou les turbines no ha tingut contacte directe amb el nucli del reactor.

Les barres de control es desplacen per la banda superior del reactor: com més avall més neutrons s’absorbeixen. Això és molt interessant: en cas de problemes es deixen caure les barres i la reacció s’atura. Deixar caure les barres no requereix gaire energia, i si falla el servosistema sempre es pot tallar

el filferro que eleva la barra amb un robot, una petita càrrega explosiva o amb intervenció humana, aquesta última com a darrer recurs.

Al voltant del 60% dels reactors nuclears al món són d'aquest tipus.

Reactors BWR

Els reactors d'aigua bullent (Boiling Water Reactor) utilitza aigua com a refrigerant i moderador, i també per generar el vapor que travessa les turbines i que es produeix directament al reactor.

Com les turbines reben vapor generat en contacte directe amb el reactor (a 7,6 MPa, 285 °C) han d'estar protegides dintre de l'edifici de contenció. A més a més el vapor s'ha de recollir a la banda superior del reactor, per tant les barres de control han de entrar per la banda inferior i necessiten energia per elevar-les i aturar el reactor. Cap dels sistemes d'emergència explicats al reactor PWR és aplicable en els reactor BWR: sense energia externa no es pot aturar el reactor.

En aquest reactors només troben dos circuits de refrigeració: el primari, que travessa el reactor i les turbines; i el secundari, que refreda el condensador.

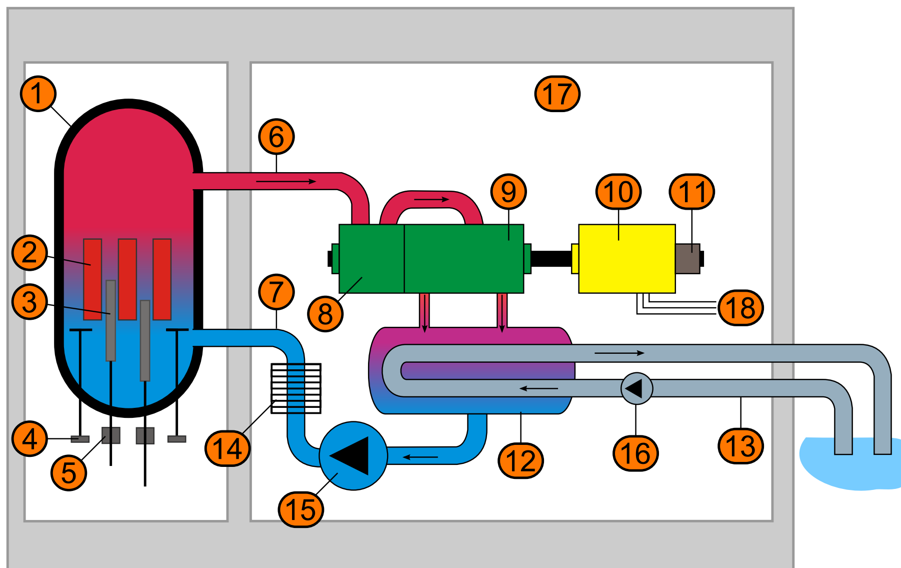


Figura 20: Central nuclear BWR. Font: By Robert Steffens, Marlus_Gancher. , https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14628031

Esquema d’una central BWR

1 Reactor
2 Combustible
3 Barres de control
4 Bombes de circulació
5 Motors de les barres de control
6 Vapor
8 Turbina alta pressió
9 Turbina baixa pressió
10 Alternador
12 Condensador
15 Bomba circuit primari
16 Bomba circuit secundari
18 Connexió al transformador

Fixeu-vos com tot el conjunt ha d’estar protegit per l’edifici de contenció

Al voltant del 25 % de centrals nuclears arreu del mon són del tipus BWR

Recanvi del combustible

Com les barres de combustible centrals són les que més han reaccionat, aquestes són reemplaçades per barres més externes, successivament, i utilitzant barres noves per reemplaçar les més exteriors.

Les barres gastades es deixen refredar a una piscina uns mesos. Després s’envien per tren a centres especialitzats en el seu aprofitament (militar moltes vegades, recordem que l’urani ^{238}U genera ^{239}Pu) o a cementiris nuclears.

Inèrcia de les centrals nuclears

Donada la complexitat i perillositat d’aquestes centrals s’han de fer moltes comprovacions en els cicles d’aturada/posada en marxa. No és estrany períodes de 2-3 dies per aquesta tasca. Recanvis de combustible, desconnexions de la xarxa elèctrica, petites fuites... A més a més es necessita energia fiable per portar-les a terme, per la qual cosa s’acostuma a construir una petita central tèrmica al seu costat.

Aquesta inèrcia no permet aturar la central a la nit, quan la demanda a la xarxa baixa. Si a la nit fa vent, moltes vegades s’han de desactivar els aerogeneradors ja que la xarxa no necessita tanta energia i no

és capaç d'emmagatzemar-la, ja que es prioritza mantenir les centrals nuclears en marxa. Aquest malbaratament de l'energia es podria evitar construint a prop de les centrals nuclears centres d'emmagatzemament d'energia, en forma d'hidrogen o amb centrals hidràuliques reversibles. Aquestes instal·lacions permetrien també no haver d'aturar les centrals nuclears en cas de desconnexió de la xarxa.

Objectiu estratègic

Tota instal·lació energètica és un objectiu estratègic de terroristes i guerres, però les centrals nuclears són especialment sensibles. Per això l'accés està molt restringit, amb perímetres d'exclusió al seu voltant, sensors de metalls i explosius... L'edifici de contenció té forma de cúpula com a defensa d'impactes de míssils o avionetes. No es estrany trobar regiments d'artilleria antiaèria o destacaments de la força aèria a prop seu. Els trens que transporten els residus nuclears són fortament custodiats.

Impacte ambiental

Els defensors de l'energia nuclear destaquen els seus avantatges: no produeix CO_2, gasten poc combustible i fins-i-tot el poden generar (l'urani ^{238}U genera ^{239}Pu que es podria profitar en altres centrals optimitzades)...

Per altra banda els detractors destaquen els seu problemes:

- Els residus tenen un tractament incert, atès que són radioactius per molts anys. Si bé fins fa unes dècades s'abocaven a fosses marines, avui en dia no és una opció ja que les dorsals oceàniques són molt actives. Cal destacar les accions de Greenpeace que van aconseguir la seva prohibició. Avui en dia l'opció amb més adeptes és l'emmagatzematge a cementiris nuclears, típicament mines en desús a gran fondària en entorns geològics adients. Espanya encara no el té resolt: paga a altres països (França. UK) per emmagatzemar temporalment els seu residus, que a la llarga tornaran al nostre país. Entre 1985 i 2005 Espanya va pagar en concepte de gestió de residus radioactius d'alta activitat la quantitat de 1 400 000 000 €.

- Si bé les mesures de seguretat és alta, no són estranys els incidents nuclears. Trobareu una llista detallada a https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents_and_incidents i https://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_nuclear_disasters_and_radioactive_incidents . Cal ressaltar els accidents de Txernòbil i Fukushima:

    - L'accident de Txernòbil, el 26 d'abril de 1986, s'ha considerat el més greu de la història. En unes proves de millora del rendiment, en que es van anul·lar criteris de seguretat, un augment

sobtat de potència al reactor número 4 de la central va provocar l'explosió de l'hidrogen acumulat dins del nucli pel sobreescalfament. L'incendi va durar 10 dies. 130 000 persones van ser evacuades. Van haver d'intervenir més de 800 000 *liquidadors*, la majoria dels quals va acabar morts o malalts. L'esperança de vida a Ucraïna va passar de 79 anys a 55 arran de l'accident. El 40% del territori europeu es va contaminar amb els productes dispersats a l'atmosfera. El núvol amb ^{131}I - que provoca càncer de tiroides- va arribar a molts països propers. La zona de Txernòbil romandrà altament contaminada i inhabitable per 40 000 anys.

- A Fukushima el 11 de març del 2011 un tsunami va fer malbé la connexió a la xarxa elèctrica i la central tèrmica auxiliar de la central. L'aplicació del protocol d'emergència, que forçava l'aturada de la central, va ser desastrós: sense energia externa per mantenir el circuit de refrigeració el sobreescalfament va originar explosions, incendis i emissió radioactiva. La mala ubicació de les piscines de residus va empitjorar tot: l'evaporació sobtada de l'aigua de les piscines va deixar a descobert els residus nuclears. Una esquerda a l'estructura del reactor va alliberar material radioactiu al mar, especialment ^{131}I i ^{137}Cs , que han estat detectats tan a les costes d'EEUU com d'Europa.

. Fonts d’energia alternatives

Estem d’acord que tota fot d’energia té una petjada ecològica. Però estem obligats a cercar fonts d’energia i centrals energètiques que ajudin a fer de la Terra un planeta sostenible.

Minihidràulica

El concepte de minihidràulica és més polític que tècnic. Les tecnologies són les mateixes que hem vist a les central hidràuliques, a petita escala. Políticament cal una legislació que contempli aquestes instal·lacions dintre de les energies renovables amb incentius fiscals i econòmics i que afavoreixi la construcció i explotació d’aquestes centrals. A Espanya té aquesta consideració les centrals que produeixen menys de 5 MW. A altres països la cobertura arriba fins als 20 MW.

Catalunya, amb 239 centrals minihidràuliques que produeixen un total de 197 MW encapçala la seva implantació a Espanya. La major part d’aquestes centrals produeix entre 250 i 1000 kW.

Energia solar

La Terra rep del Sol una energia anual d'uns $5{,}4 \cdot 10^{24}$ J, unes 4500 vegades l'energia que es consumeix. L'energia solar, per tant, és una bona candidata a reemplaçar les fonts d'energia convencionals.

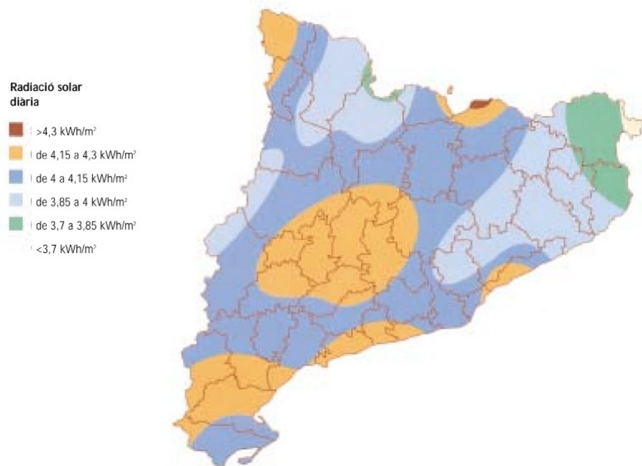


Figura 21: Flux d'energia radiant diària a Catalunya (kW·h). Font: Institut Català d'Energia

Naturalment, la potencia rebuda per m^2 (anomenada irradiació o senzillament radiació solar mitjana, per la que utilitzem la lletra *I* que es mesura en $W \cdot m^{-2}$) depèn de factors com la latitud, alçada, època de l'any... Tenint en compte que a més a més l'atmosfera redueix al 30% aquest valor (absorció, reflexió, dispersió) podem dir que tenim al nostre abast al voltant de 1000 $W \cdot m^{-2}$ d'energia del sol que podem aprofitar. Podem dir que a Catalunya rebem un flux d'energia radiant diari ϕ_r d'uns 15 MJ/m^2 .

Aquesta energia solar la podem convertir directament en energia elèctrica (energia solar fotovoltaica) o en calor (energia solar tèrmica). La calor es pot utilitzar directament en sistemes de calefacció, assajos, soldadures... o convertir en energia elèctrica (centrals termosolars).

Energia solar fotovoltaica

Les cèl·lules fotovoltaiques fan una conversió directa d’energia radiant en energia elèctrica utilitzant semiconductors.

Si bé als anys 70 el rendiment d’aquestes cèl·lules era inferior al 25 %, avui en dia s’han aconseguit cèl·lules amb un rendiment del 47 %, i les perspectives de millora amb nous materials com ara el grafè son esperançadores.

Per altra s’han abaratit molt: les de Si han baixat dels 76 $/W al 1977 a 0,30 $/W al 2015.



Figura 22: Central fotovoltaica al sostre de la plaça del Fòrum de Barcelona. Font: Jordi Orts

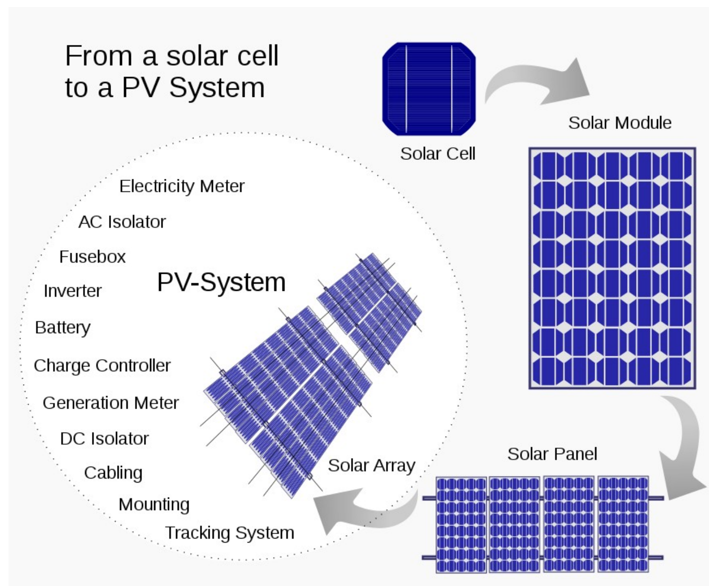


Figura 23: De la cèl·lula fotovoltaica a la central fotovoltaica. Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#/media/File:From_a_solar_cell_to_a_PV_system.svg

Aquestes cèl·lules donen un voltatge i intensitat petits, per la qual cosa als panells fotovoltaics es connecten moltes d’elles en sèrie (per guanyar tensió) i paral·lel (per guanyar intensitat).

La tensió generada és CC. Poden estar estàtiques i aprofitar directament aquest CC: només caldrà cablejar els panells. Si volem que segueixin el Sol per millorar la producció haurem d’implementar un sistema de seguiment que posi les cèl·lules perpendiculars als raigs de llum. Si volem emmagatzemar l’energia caldrà posar bateries i un sistema de regulació de càrrega.

Si a més a més volem tenir AC ens caldrà un inversor. Si el consum no és local sinó que volem injectar aquesta energia a la xarxa encara haurem de instal·lar més aparells.

Per tot això les instal·lacions fotovoltaiques són molt diverses. Des d’alimentar una calculadora de butxaca, a alimentar un senyal de trànsit o un panell d’informació de la parada de bus, recarregar els portàtils d’un col·legi, generar 220 V AC a una masia o contribuir a la xarxa elèctrica nacional. Tot compta: cada kWh generat es un avanç cap a un model energètic sostenible.

Impacte ambiental

Si bé la seva explotació és molt neta, hem d’anar en compte amb la petjada ecològica de la seva fabricació. No és el mateix utilitzar Si, present a la sorra comú, a utilitzar AsGa: el 25 d’abril de 1998 en trencar-se una presa 4600 ha de la conca del Guadiamar van ser contaminades pel As i Zn utilitzats per l’empresa sueca Boliden en la fabricació de les seves cèl·lules solars. L’aigua d’aquest riu alimenta el Parc Nacional de Doñana, clau per a la fauna de molts països. 20 anys després l’empresa encara no ha assumit els costos de la seva negligència, al voltant de 90 000 000 € que va costar la intervenció pública per controlar i compensar el desastre ecològic.

L’energia fotovoltaica pot ser tan neta com vulguem. Només hem d’assumir el cost i evitar materials contaminants.

Energia solar tèrmica

«Es una cálida tarde de verano en la Antigua Grecia. Has terminado de hacer tus compras en el mercado local o Ágora (toma nota) y vuelves para casa.»

Com bé deia Sheldom a *The Big Bang Theory*, la calor que ens proporciona el Sol és una vella coneguda de la humanitat. Actualment intentem optimitzar el seu aprofitament. Veiem alguns exemples:

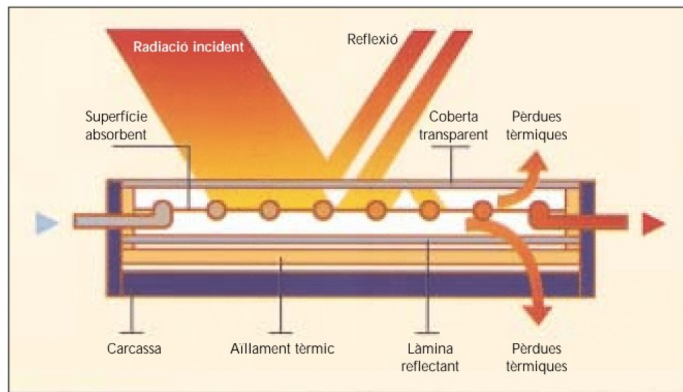


Figura 24: Captador solar. Font: El recorregut de l'energia. Energia solar

Un **captador solar** funciona com a trampa per a la radiació. Una coberta transparent permet entrar la llum del sol però reflecteix els infrarojos que no poden sortir. Un tubs que absorbeixen la radiació (pintats de negre) escalfen l’aigua que hi circula. Les parets aïllants eviten les pèrdues. Tot funciona com un hivernacle en miniatura, on s’aconsegueixen temperatures de fins a 80 °C. Molt útils per calefacció d’habitatges, piscines...

La concentració dels raigs de llum del sol per aconseguir grans temperatures és coneguda des de fa segles. La bola de coure daurat de 2,5 m de diàmetre que corona la cúpula de Brunelleschi a Fiorenza n’és un exemple. Leonardo da Vinci també utilitzava aquesta tècnica per fondre i soldar metalls. *Miralls de foc*, els anomenava.



Figura 25: Font Romeu: Camp d'heliòstats. Font: Jordi Orts

A Font-Romeu hi ha un forn solar que segueix el mateix principi: un camp de 63 heliòstats (miralls que segueixen el Sol) alimenta un mirall parabòlic de 40 m d’alçada i 2000 m^2 de superfície que concentra la potència recollida (1 MW) sobre una superfície de 20 cm de radi, que experimenta una temperatura que pot arribar fins als 3200 °C. Aquest forn és utilitzat per la indústria de l’espai d’arreu el món per fer assajos de materials: comportament a la reentrada a l’atmosfera de naus i d’altres condicions extremes, com ara el xoc tèrmic en activar el conjunt de cop, amb el brusc canvi de temperatura associat.



Figura 26: Font Romeu: Mirall parabòlic i torre d'assajos. Font: Jordi Orts

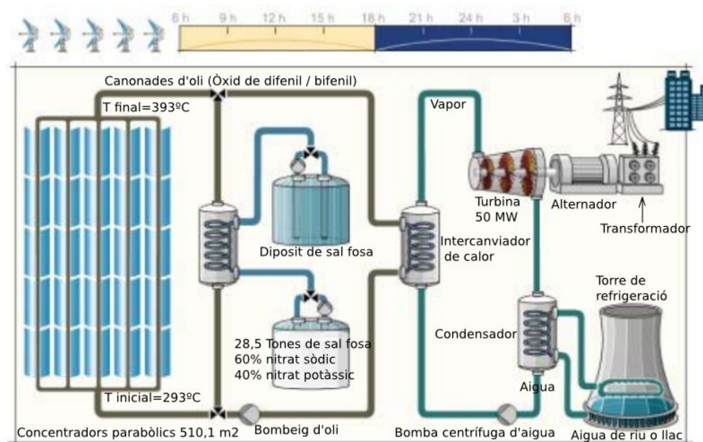


Figura 27: Planta solar tèrmica d'Andasol. Font: By Cferrando - Treball propi, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32457482

Diferents tecnologies s'estan experimentant per convertir aquesta energia solar tèrmica en elèctrica. Com a qualsevol central tèrmica, cal escalfar un fluid (energia cinètica) per moure un conjunt turbina (energia de rotació) / alternador (energia elèctrica).

Per exemple a la central d'Andasol el fluid és un oli mineral que s'escalfa dels 293 °C fins als 393 °C i que alimenta un generador de vapor, iniciant el cicle típic d'una central tèrmica.

Impacte ambiental

En totes aquestes tecnologies la petjada ecològica més important es produeix en la fabricació, difícilment en la seva explotació. Naturalment cal estudiar cada cas particular.

Energia eòlica

El vent és una altra poderosa font d’energia neta, utilitzada des de l'antiguitat i present arreu del mon. Encara es pot millorar molt la seva explotació. El gran repte tecnològic és la seva variabilitat: diferents intensitats, diferents alçades, direccions... que normalment canvien a una mateixa ubicació. S’han dissenyat diverses instal·lacions per optimitzar el seu aprofitament, la més comercialitzada és l’aerogenerador: una naveta o góndola que pot girar horitzontalment s’eleva amb una torre fins a l’alçada òptima per enfrontar-se al vent, la força del qual és recollit per unes pales connectades a un rotor. A l’interior de la naveta, mitjançant un multiplicador, aquest gir es transmet a un generador elèctric.

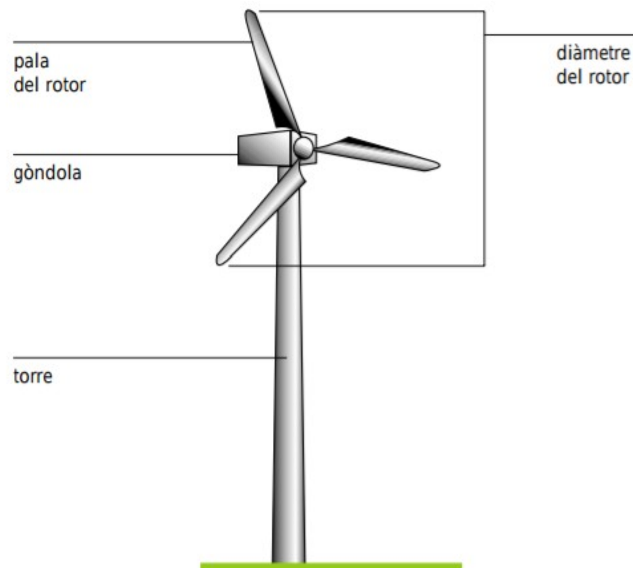


Figura 28: Aerogenerador. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica

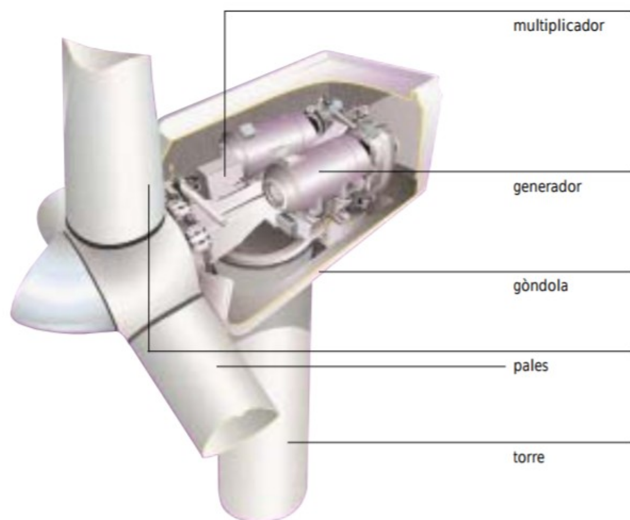


Figura 29: Interior de la góndola d'un aerogenerador. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica

La naveta gira amb un servomecanisme que rep informació de la direcció i velocitat del vent gràcies a uns sensors que incorpora a la seva part superior. Normalment aquest sistema orienta les pales perpendicularment al vent, però si la intensitat del vent es molt forta el sistema reduirà la secció eficaç per evitar malmetre la instal·lació, fins-i-tot posant les pales paral·leles al vent quan el vent sigui massa intens, ja que posaria en perill la integritat de la instal·lació. També caldrà posar les pales paral·leles al vent quan la xarxa elèctrica sigui incapaç d’absorbir l’energia generada. Actualment aquesta situació és massa freqüent a la nit al nostre país, ja que no es poden desconnectar les centrals nuclears ni emmagatzemar l’excés d’energia produïda.

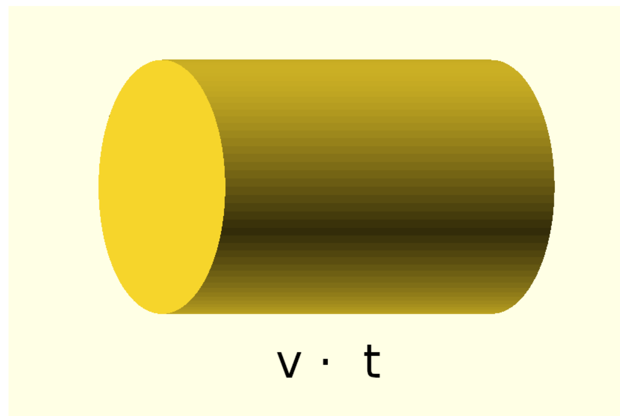
Un dels problemes en el disseny de les instal·lacions eòliques és la dependència cúbica de la potència amb la velocitat del vent. Si estudiem l'energia cinètica del cilindre de aire que impacta amb les pales de l'aerogenerador veiem que la podem expressar com:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v \cdot t \cdot v^2$$

dividint per *t* tindrem la potència

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3$$

Agrupant les constants:



$$P = k \cdot v^3$$

Es a dir, un factor 3 en la velocitat del vent implica un factor 27 en la potència del vent incidint, i que pot posar en perill la integritat de la instal·lació.

Parcs eòlics

Existeix una amplia gamma d'aerogeneradors amb potències que arriben als MW i que poden treballar de forma eficient amb vents de 3 m/s fins als 24 m/s. Típicament la potència màxima s'assoleix als 14 m/s.

No és fàcil trobar ubicacions on es donin aquests vents de forma regular (unes 2500 hores/any per ser rendibles) i a una mateixa alçada. Per això és normal aprofitar al màxim aquestes ubicacions, instal·lant un gran nombre d'aerogeneradors per aprofitar al màxim aquest recurs en els anomenats parcs eòlics. D'aquest manera també s'optimitzen costos, centralitzant l'adequació de l'energia produïda per a la xarxa elèctrica la seva connexió.

Un dels reptes actuals és l'aprofitament de l'energia eòlica al mar, amb plataformes on ubicar els aerogeneradors. Només cal sentir els parts meteorològics a les notícies per ser conscient de la dimensió del recurs que tenim a prop de les nostres costes. No és un problema fàcil: fixar l'estructura a una ubicació sotmesa a corrents, onades i marees, amb uns problemes diferents de corrosió al que trobem a les instal·lacions terrestres. Fins i tot trobarem projectes de construcció d'illes artificials per explotar aquestes ubicacions, com Power Link[XA2017], amb milers d'aerogeneradors i 30 GW de potència.

Autoconsum

Tenint a l’abast instal·lacions eòliques de tota mida, així com de fotovoltaiques, no es estrany trobar instal·lacions a granges o petites indústries que combinin aquestes energies pel consum propi.

En aquest cas la producció és de CC, permetent el seu emmagatzemament amb bateries (que han experimentat una notable millora els darrers anys) i la seva conversió amb AC mitjançant onduladors o inversors.

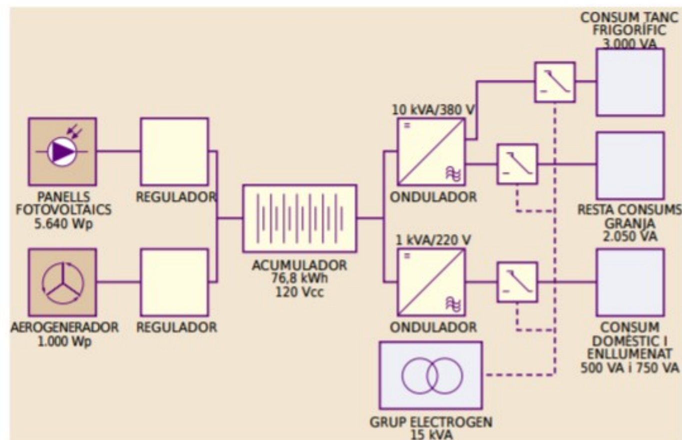


Figura 30: Esquema de funcionament d’una instal·lació eòlica-fotovoltaica. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica

Impacte ambiental

Si bé l’energia eòlica és molt neta (no genera emissions de CO_2 ni contaminants) té, com a qualsevol energia, una petjada ecològica: pensem en la fabricació i instal·lació dels seus components, l’impacte visual i acústic al seu entorn... Fins i tot no és estrany veure algun ocell migratori mort a prop d’un dels

múltiples aerogeneradors a un parc eòlic per l'impacte amb les pales (problema comú amb els aeroports i que en aquest cas ningú en parla: tenint el mateix problema tenen les mateixes solucions).

Energies del mar

Ja hem vist que l'energia eòlica al mar és un recurs important. Però trobarem moltes més formes d'energia als mars i oceans, i cal recordar que ocupen el 70% de la superfície del nostre planeta.

Energia mareomotriu

Podem aprofitar el moviment de grans masses d'aigua salada en les marees construint dics per emmagatzemar i transformar aquest flux d'energia mitjançant turbines incorporades als dics. A Rance trobarem una central d'aquest tipus. El problema de les marees és que només es produeixen 2 cops al dia, però aquesta central ha obert una línia nova[NA2013] en la recerca de centrals reversibles per a l'emmagatzemament d'energia sobrant a la xarxa elèctrica.



Figura 31: Central mareomotriu a Rance. S'observa a les boies la diferència d'alçades pel dic. Font: Roser Cussó, trebal propi.

Energia de les onades (undimotriu)

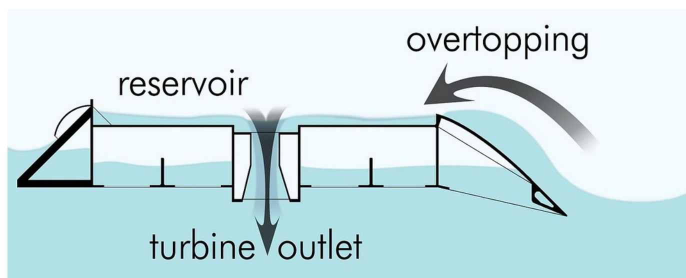


Figura 32: Instal·lació Wave Dragon. Font: By Erik Friis-Madsen at en.wikipedia, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11336468

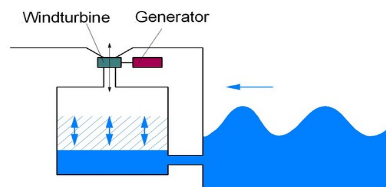


Figura 33: Instal·lació undimotriu amb càmera pneumàtica. Font:CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50095

A les nostres costes l’energia de les onades o energia undimotriu representen una font d’energia important. Aprofitada fa segles, com el cas del molí fariner a la platja de Vilanova i la Geltrú, trobarem diversos dissenys per a aquestes instal·lacions, com la danesa *Wave Dragon*, on uns reflectors dirigeixen l’onada cap a un depòsit elevat i una turbina tipus Kaplan genera electricitat amb aquest salt d’aigua. Altres instal·lacions utilitzen càmeres pneumàtiques, boies, o conversors que oscil·len amb les onades. Cadascun d’aquest dissenys està optimitzat per a una distància de la costa, si utilitza o no elements flotants i les pròpies característiques de les onades a la seva ubicació.

Energia maremotèrmica del gradient tèrmic (OTEC)

La diferència de temperatures entre aigües superficials i profundes es pot aprofitar amb diversos tipus de centrals OTEC (Ocean Thermal Energic Conversion).

Les centrals OTEC de cicle tancat utilitzen un fluid amb un punt d’ebullició baix, com l'amoníac (que té un punt d’ebullició de -33 °C a pressió atmosfèrica), per generar gas a pressió per moure una turbina.

Es tracta d’una central tèrmica on l’aigua s’ha reemplaçat per amoníac. L’aigua de la superfície actua com a font de calor, i l’aigua profunda com a refrigerant del condensador.

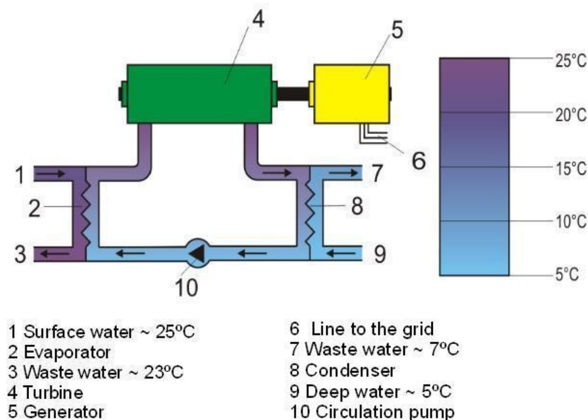


Figura 34: Diagrama central OTEC cicle tancat. Font: RobbyBerderivative work: Lumos3 CC BY-SA 1.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12865200

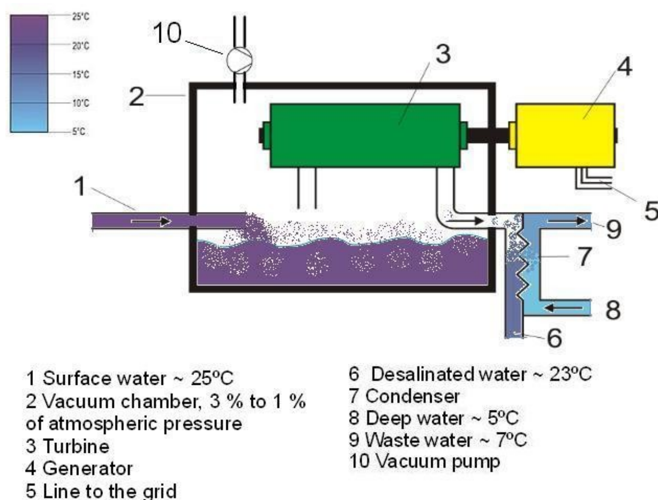


Figura 35: Central OTEC de cicle obert. Font: RobbyBer derivative work: Lumos3 CC BY-SA 1.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12927110

A les centrals OTEC de cicle obert l’aigua de la superfície entra en un recipient a baixa pressió provocant la seva ebullició. En alguns dissenys l’expansió del vapor fa girar directament una turbina, per tornar a estat líquid al condensador refrigerat per aigua profunda.

En altres dissenys s’utilitzen tècniques de bombeig de bombolles per aconseguir columnes d’aigua amb una alçada important, que generaren electricitat com a una central hidràulica.

Energia de les corrents marines.

Diverses corrents marines, com ara ENSO (*el Niño),* travessen el planeta arrossegant una energia estimada de 5000 GW. S’han proposat diferents tecnologies per explotar aquesta energia, com ara generador semblants als eòlics fixats al fons marí.

Impacte ambiental

Totes aquestes tecnologies d'aprofitament tenen diverses petjades ecològiques, penseu només en el canvi de règim de marees a Rance sobre la fauna marina o l'efecte d'extreure energia de les onades i la disminució de l'erosió i transport de material a la costa. Però cal destacar un element comú: estem parlant de extreure energia de processos globals del planeta. Si explotem de forma significativa l'energia transmesa, per exemple, per la corrent de *El Niño* els seus efectes climàtics poden ser a nivell planetari.

Energia geotèrmica

La calor interna del nostre planeta és una altra font formidable d'energia. Només cal pensar en un volcà o en els géisers del parc de Yellowstone. O en les nombroses caldes al nostre voltant.

Els jaciments geotèrmics, zones del subsòl on aquest recurs és susceptible de ser aprofitat, es classifiquen segons la temperatura. Amb temperatures de 70 °C ja es pot generar electricitat de forma rendible, i als jaciments d'alta temperatura (T>150 °C) podem generar directament vapor d'aigua.

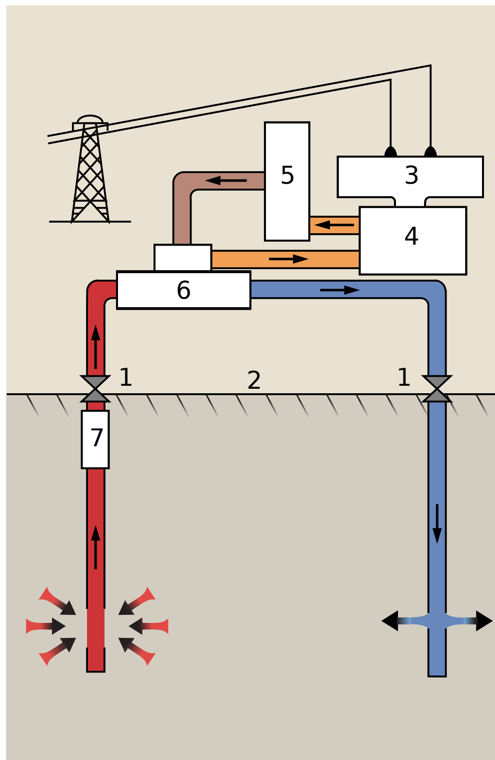


Figura 36: Central geotèrmica. Font: Wendell A. Duffield, John H. Sass https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24639445

A les centrals geotèrmiques s’injecta aigua per un pou a la roca subterrània i es recull escalfada per una canonada. Aquesta aigua calenta transmet la calor a un bescanviador on es vaporitza aigua o un altre fluid, com ara isobutà, per fer moure les turbines.

Es a dir, una central tèrmica convencional on la font de calor és el jaciment geotèrmic.

Donada la localització geogràfica d’aquests jaciments, aquestes centrals les trobem concentrades en pocs països. Cal destacar les centrals de Geysers (USA, 1590 MW), Cerro Prieto (Mèxic, 820 MW), Larderello (Itàlia, 769 MW), Olkaria (Kenya, 727 MW), Imperial Valley (USA, 403 MW), Sarulla (Indonèsia, 330 MW), Tiwi (Filipines, 330 MW) i Hellishellði (Islàndia, 303 MW).

Impacte ambiental

Si bé l’aigua escalfada pot contenir contaminants presents a les roques com ara CO2, Hg, As, Sb... típicament aquests productes es tornen a injectar a la roca, evitant l contaminació del seu alliberament. La pròpia construcció de la central pot afectar la estabilitat del terra, així com la seva explotació, en injectar aigua a la roca, fins-i-tot produint terratrèmols. Es va haver de suspendre un projecte de central a Basilea (Suïssa) ja que havia provocat més de 10000 sismes (arribant a 3,4 l'escala de Richter) als primers 6 anys d’injecció d’aigua. Per altra banda aquestes centrals poden trencar el cicle natural dels géisers, com va passar a Beowawe, Nevada.

Biomassa i residus renovables

Amb biomassa ens referim al conjunt de matèria orgànica d’origen vegetal o animal, que inclou els materials procedents de la transformació natural o artificial.

Si bé aquest materials s’han utilitzat des de l'antiguitat, la cerca d’un model sostenible ha revolucionat el seu ús.

L’energia de la biomassa prové de la llum solar, que alimenta amb la fotosíntesis la piràmide alimentària de la vida.

El seu aprofitament no té un impacte mediambiental significatiu: el CO2 alliberat en la combustió dels seus productes él el mateix CO2 capturat a la fotosíntesis, amb una emissió neta nul·la. Tot així emissions d’altres productes com ara els òxids de nitrogen no és recomanable en zones incloses en plans d’actuació de millora de la qualitat de l’aire.

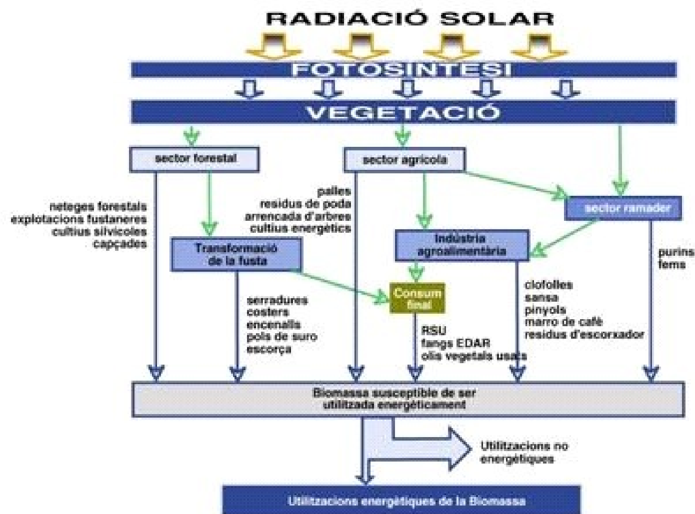


Figura 37: Tipus de biomassa. Font: ICAEN

Diferents tractaments de la biomassa permeten el seu aprofitament. Després d’uns tractaments previs (homogeneïtzació, densificació) s’apliquen tractaments termoquímics (combustió, piròlisi, gasificació) o biològics (digestió anaeròbia, fermentació alcohòlica).

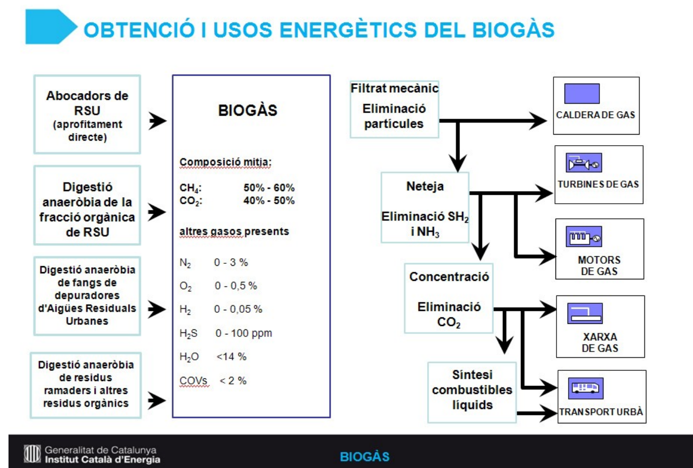


Figura 38: Ús energètic del biogas. Font: ICAEN

Amb la destil·lació de productes vegetals s'aconsegueixen biocarburants com ara el bioetanol i el biodièsel. El biogàs s'obté de tractaments biològics.

La incineració de deixalles domèstiques, amb filtres per evitar l'emissió de partícules contaminants i compostos nocius, o la disposició i metanització dels RSU són altres de les possibles aplicacions energètiques d'aquests residus.

Centrals nuclears de fusió

Si bé fa dècades que utilitzem centrals de fissió nuclear, encara no disposem de centrals de fusió. Els avantatge són clars: tenim combustible arreu (deuteri i triti present a l'aigua), els productes generats (He) no són perillosos, no es tracta d'una reacció en cadena que es pugui descontrolar...

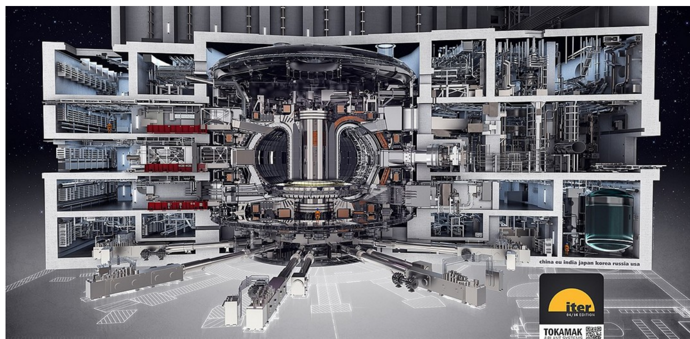


Figura 39: Reactor tokamak ITER. Font: Oak Ridge National Laboratory - CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74249991

El problema és que encara no tenim una instal·lació que produeixi més energia que la gastada en iniciar la reacció nuclear. En aquest sentit cal destacar el projecte ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) d’un reactor *tokamak*, iniciat al 1986 i que hauria d’estar operatiu al 2025, iniciativa internacional que hauria d’aconseguir escalfar de forma uniforme el plasma d’hidrogen fins als $1,5 \cdot 10^8$ °C.

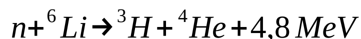
Posteriorment hauria de produir 10 vegades més energia que la gastada en el seu funcionament. L’ITER[XA2020] utilitzarà un plasma de ions deuteri i triti confinats a un *tokamak* amb un camp magnètic generat per 100 000 km de Nb_3Sn superconductor a 4 K. La fusió d’aquests isòtops genera ions He (que per la seva càrrega queden confinats al *tokamak*, mantenint la seva temperatura) i allibera neutrons d’alta energia que, per no tenir càrrega, escapen del confinament del *tokamak:*



$$^{2}H + ^{3}H \rightarrow ^{4}He\left(3{,}52\,MeV\right) + n\left(14{,}06\,MeV\right)$$

Aquests neutrons escalfen l'aigua a pressió que circula fora del *tokamak*. En futurs reactors (*DEMO* serà el pas següent després del ITER) aquesta aigua a pressió escalfada generarà electricitat, de forma semblant a un reactor PWR de fissió.

Així com el deuteri és força abundant (un 0,015 % de l'hidrogen de l'aigua és deuteri), el triti rarament es troba a la natura, però es pot produir bombardejant Li amb neutrons. Per això a l'ITER es faran proves de producció de triti a alguns dels mòduls *blanket* que envolten el *tokamak*, on els neutrons produïts a la fusió es recombinaran amb àtoms de ^{6}Li, produint He i triti:



$$n + {}^{6}Li \rightarrow {}^{3}H + {}^{4}He + 4{,}8\, MeV$$

En una central que generés el seu propi triti, només es gastaria com a combustible ^{2}H i ^{6}Li. A un m³ d'aigua trobem 33 g de deuteri. El ^{6}Li representa el 7,5% del Li. Els recursos terrestres de Li permetrien un funcionament de les centrals de fusió durant 1000 anys, però el Li també es pot obtenir de l'aigua de l'oceà, amb un estoc suficient per a 6 milions d'anys[IT2020].

Una vegada funcioni ITER, es treballarà en *DEMO*, el primer prototip de reactor nuclear de fusió autosuficient en triti, amb una producció contínua 24/7 de 300 a 500 MW[EF2020]. Però això serà al 2040.

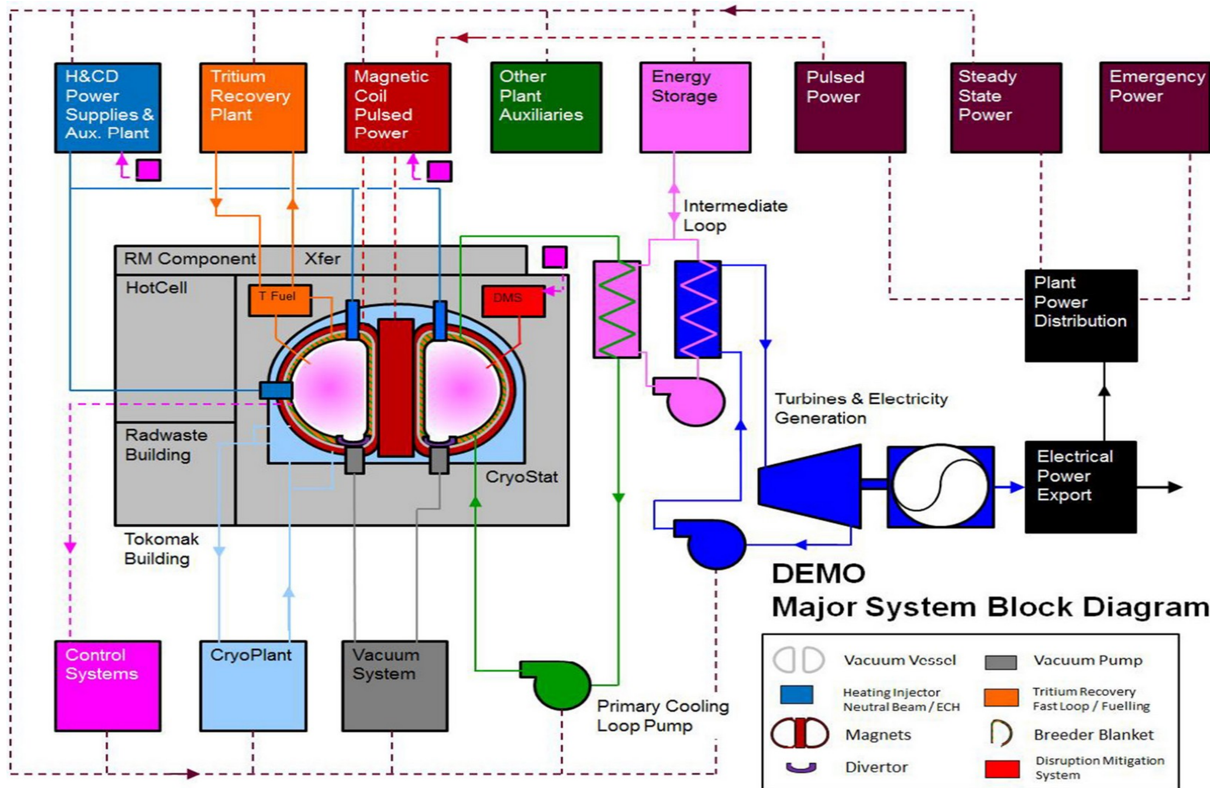


Figura 40: Esquema del reactor nuclear de fusió DEMO. Font: By G. Federici et al. - (2017). "European DEMO design strategy and consequences for materials". Nuclear Fusion 57 (9): 092002. DOI:10.1088/1741-4326/57/9/092002. ISSN 0029-5515. Figure 1, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71564155

. Cap a un mon sostenible: la necessària transició energètica

Si analitzem el flux mundial d'energia, un diagrama de Sankey (l'amplada de les fletxes son proporcional al valor del flux), podem ràpidament treure'n algunes conclusions:

- Les energies convencionals encara dominen el món. Els combustibles fòssils (gas natural, carbó i petroli) representen el gruix de l'energia consumida.

- Aquest predomini de l'energia fòssil és absolut a la seva utilització pel transport, on el petroli representa el 95 % de l'energia consumida

- Les pèrdues energètiques a nivell global són inacceptables. És perd molta més energia de la que s'aprofita, produint l'escalfament global del planeta.

- A la conversió elèctrica es perd un 62 % de l'energia. Podem dir que per cada kWh d'electricitat que aconseguim escalfem el planeta en el doble d'aquesta quantitat.

Com veieu vivim un model energètic no sostenible. O el canviem o no ens en sortirem.

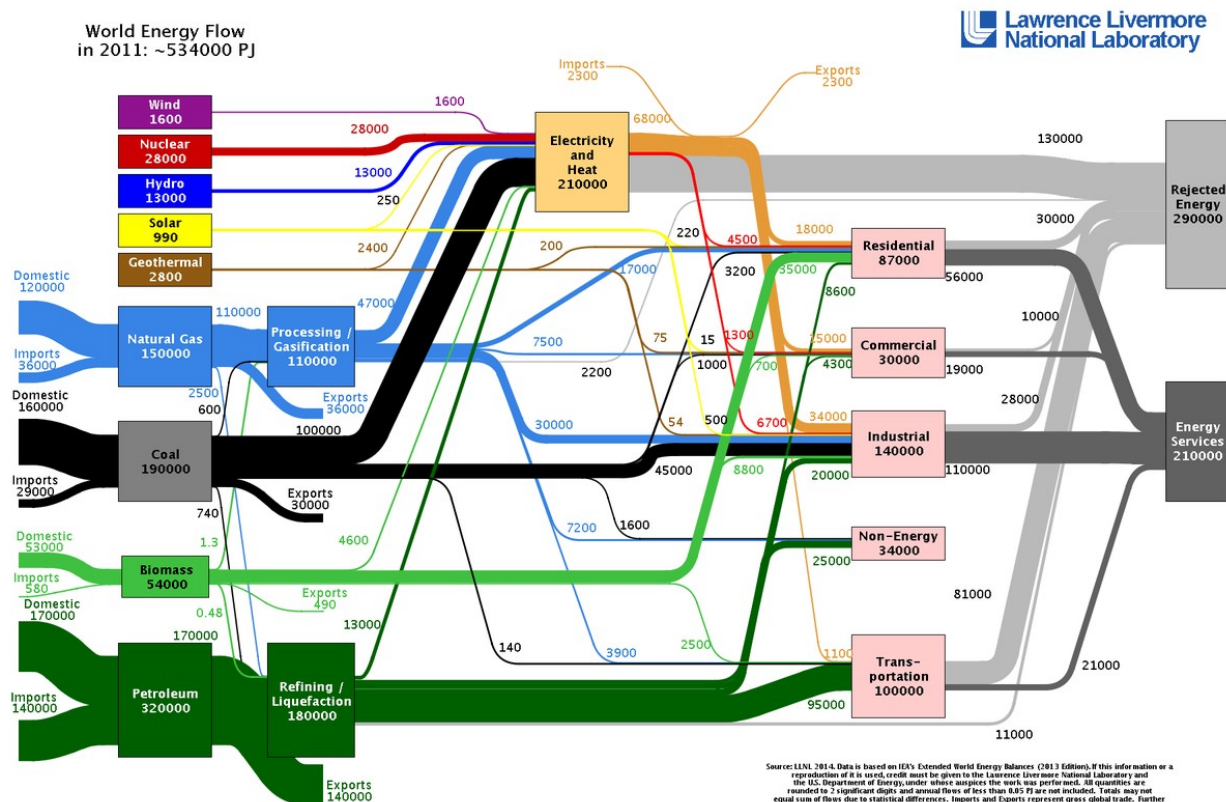


Figura 41: Flux mundial d'energia al 2011. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy

Tractant-se d’un diagrama mundial un pot pensar que la culpa és d’altres països. Veiem en detall diagrames per a Espanya i USA. En el darrer cas les xifres són més modernes, no per això millors, i sense esperança de canvi en els propers anys donada la política energètica de l’actual administració:

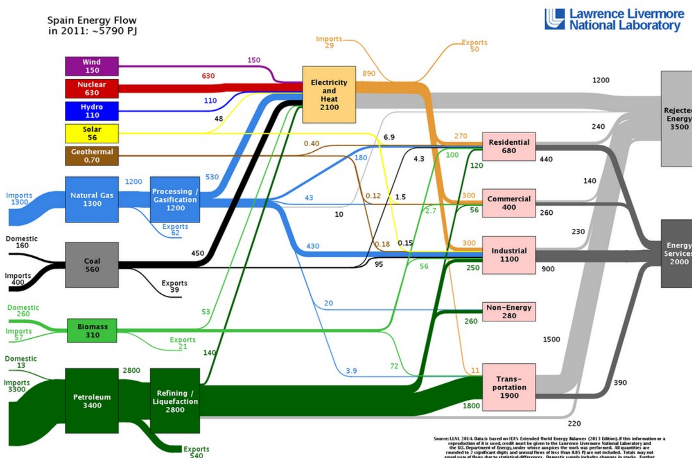


Figura 42: Flux d'energia a Espanya al 2011. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy

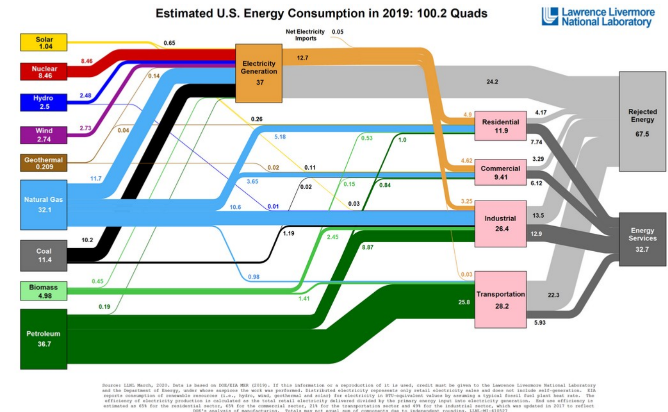


Figura 43: Flux d'energia a USA al 2019. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy

Cal, per tant, una transició en el model energètic cap a un desenvolupament sostenible. Podem millorar molt en els següents camps:

- Transició en el model de transport, desenvolupant vehicles elèctrics o que utilitzin biocombustibles, desplaçant el consum del petroli en aquest camp. El consum i turisme de proximitat, així com el teletreball, poden ser de gran ajut.

- Millorar el rendiment de les centrals elèctriques, potenciant l'ús d'energies netes com ara la minihidràulica, l'eòlica i fotovoltaica i substituint les centrals tèrmiques convencionals per centrals de cogeneració que utilitzin combustibles renovables, com ara la biomassa. Tancament de les centrals nuclears. Evitar pèrdues en el transport de l'energia elèctrica.

- Per garantir el subministrament elèctric i donada la variabilitat de les energies solars i eòlica, cal desenvolupar sistemes d'emmagatzemament d'energia, locals i a la xarxa, utilitzant bateries, centrals hidroelèctriques reversibles, depòsits d'hidrogen i, fins-i-tot, la construcció d'illes artificials generadores/emmagatzemadores d'energia.

- Fer un millor ús de l'energia, amb habitatges i aparells més eficients i conscienciant als consumidors dels hàbits que afavoreixen un consum responsable. Recordem que l'energia més ecològica és aquella que no es consumeix.

En aquesta línia és molt recomanable el material didàctic *Les energies renovables. L'alternativa al col·lapse de les energies fòssils*[CES2016]

Bibliografia

CES2016: J. Pujol, R. Fernández, J. Regalés, Les energies renovables. L'alternativa al col·lapse de les energies fòssils, , https://agora.xtec.cat/cesire/general/les-energies-renovables-lalternativa-al-col%C2%B7lapse-de-les-energies-fossils/
EF2020: , The demonstration power plant: DEMO , , https://www.euro-fusion.org/programme/demo/
IT2020: , Fuelling the Fusion Reaction, , https://www.iter.org/sci/fusionfuels
NA2013: Notícias Ambientales, Bélgica: construirán una isla para almacenar energía eólica y sustituir la nuclear, , https://noticiasambientales.com/energia/belgica-construiran-una-isla-para-almacenar-energia-eolica-y-sustituir-la-nuclear/
XA2017: Anna Martí, Islas artificiales y 10.000 turbinas: así se quiere aprovechar al máximo el viento para energía en el norte de Europa, , https://www.xataka.com/energia/islas-artificiales-y-10-000-turbinas-asi-se-quiere-aprovechar-al-maximo-el-viento-para-energia-en-el-norte-de-europa
XA2020: Juan Carlos López, El reactor de fusión nuclear ITER, pieza a pieza: así funcionará una de las mayores obras de ingeniería creadas por el hombre, 2020, https://www.xataka.com/investigacion/reactor-fusion-nuclear-iter-pieza-a-pieza-asi-funcionara-mayores-obras-ingenieria-creadas-hombre

Índex d'il·lustracions

Figura 1: Pas de l'aigua d'un riu a través d'una central hidroelèctrica. Font: Cristianrodenas/Thoti/Tomia CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16957065..10
Figura 2: Presa de Boadella. Font: Inventario de presas y embalses (IPE) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://sig.mapama.gob.es/snczi/..13
Figura 3: Presa de Cavallers. Font: De Josep Borrut - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15766859..15
Figura 4: Presa de Susqueda. Font: Inventario de presas y embalses (IPE) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico https://sig.mapama.gob.es/snczi/..16
Figura 5: Selecció de turbines en funció del cabal i el salt. Font: By NACLE2 - File:Water Turbine Chart.png, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9319992..17
Figura 6: Secció d'una instal·lació amb turbina Pelton. Font: By Voith Siemens Hydro Power Generation - http://www.voithsiemens.com, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=463252........18
Figura 7: Turbina Pelton. Font: By Andy Dingley - Own work, CC BY https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2007524..18
Figura 8: Deflectors (en groc) d'una turbina Francis configurats a flux ple. Font: By The original uploader was Stahlkocher at German Wikipedia. - Originally from de.wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=85431..19
Figura 9: Rotor d'una Turbina Francis. Font: By Voith Siemens Hydro Power Generation - Homepage: http://www.voithsiemens.com, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=546624........19
Figura 10: Turbina Kaplan acoblada a l'alternador. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?

curid=18581340..20
Figura 11: Turbina Kaplan. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2050462...........................20
Figura 12: Diagrama i parts més importants d'una central tèrmica de carbó i cicle convencional. Font: BillC CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2842716...25
Figura 13: Canonades refrigeració central tèrmica Sant Adrià de Besòs. Font: Jordi Orts.....................................27
Figura 14: Torre de refrigeració central tèrmica Cercs. Font: Jordi Orts...27
Figura 15: Sala de turbines a la central de Sant Adrià de Besòs. Font: Jordi Orts..28
Figura 16: Turbina de baixa pressió d'una central nuclear. Font: By Christine und David Schmitt, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16157413..28
Figura 17: Xemeneia central tèrmica de Cercs. Font: Jordi Orts...29
Figura 18: Distribució de productes de la fissió de l'urani 235. Font: Users:Mubs, KES47 CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11171477..33
Figura 19: Central nuclear PWR. Font: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=315039.....................36
Figura 20: Central nuclear BWR. Font: By Robert Steffens, Marlus_Gancher. , https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14628031..38
Figura 21: Flux d'energia radiant diària a Catalunya (kW·h). Font: Institut Català d’Energia.................................44
Figura 22: Central fotovoltaica al sostre de la plaça del Fòrum de Barcelona. Font: Jordi Orts..............................45
Figura 23: De la cèl·lula fotovoltaica a la central fotovoltaica. Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#/media/File:From_a_solar_cell_to_a_PV_system.svg............................46
Figura 24: Captador solar. Font: El recorregut de l'energia. Energia solar...48
Figura 25: Font Romeu: Camp d'heliòstats. Font: Jordi Orts..49
Figura 26: Font Romeu: Mirall parabòlic i torre d'assajos. Font: Jordi Orts..49
Figura 27: Planta solar tèrmica d'Andasol. Font: By Cferrando - Treball propi, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32457482..50
Figura 28: Aerogenerador. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica...51
Figura 29: Interior de la góndola d'un aerogenerador. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica...................52

Figura 30: Esquema de funcionament d’una instal·lació eòlica-fotovoltaica. Font: El recorregut de l'energia. Energia eòlica....55
Figura 31: Central mareomotriu a Rance. S'observa a les boies la diferència d'alçades pel dic. Font: Roser Cussó, trebal propi....56
Figura 32: Instal·lació Wave Dragon. Font: By Erik Friis-Madsen at en.wikipedia, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11336468....57
Figura 33: Instal·lació undimotriu amb càmera pneumàtica. Font:CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=50095....57
Figura 34: Diagrama central OTEC cicle tancat. Font: RobbyBerderivative work: Lumos3 CC BY-SA 1.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12865200....58
Figura 35: Central OTEC de cicle obert. Font: RobbyBer derivative work: Lumos3 CC BY-SA 1.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12927110....59
Figura 36: Central geotèrmica. Font: Wendell A. Duffield, John H. Sass https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24639445....61
Figura 37: Tipus de biomassa. Font: ICAEN....63
Figura 38: Ús energètic del biogas. Font: ICAEN....64
Figura 39: Reactor tokamak ITER. Font: Oak Ridge National Laboratory - CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=74249991....65
Figura 40: Esquema del reactor nuclear de fusió DEMO. Font: By G. Federici et al. - (2017). "European DEMO design strategy and consequences for materials". Nuclear Fusion 57 (9): 092002. DOI:10.1088/1741-4326/57/9/092002. ISSN 0029-5515. Figure 1, CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71564155....67
Figura 41: Flux mundial d'energia al 2011. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy....69
Figura 42: Flux d'energia a Espanya al 2011. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy....70

Figura 43: Flux d'energia a USA al 2019. Font: Lawrence Livermore National Laboratory, Department of Energy https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy..70